

引用本文: 黄菊, 赵响, 赵玉青, 等. 基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信[J]. 光通信技术, 2025, 49(1): 17-24.

基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信

黄菊, 赵响*, 赵玉青, 赵文波
(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了提升可见光移动通信系统的隐蔽传输性能, 采用随机发送功率策略来增加监测者的检测不确定程度, 构建了联合约束条件下的有效隐蔽速率最大化问题, 基于图解法获得了最优发光二极管(LED)发射机发送功率分配比与最优无人机位置, 并设计了仿真实验。仿真结果验证了所提方案可以显著提升基于非正交多址接入的可见光移动通信中隐蔽用户的有效隐蔽速率。

关键词: 可见光通信; 隐蔽通信; 非正交多址接入; 无人机; 功率分配; 位置优化

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)01-0017-08

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Covert communication in visible light wireless mobile systems based on NOMA

HUANG Ju, ZHAO Xiang*, ZHAO Yuqing, ZHAO Wenbo

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to improve the covert transmission performance of visible light mobile communication systems, a random transmission power strategy was adopted to increase the detection uncertainty of monitors. An effective covert rate maximization problem under joint constraint conditions was constructed. Based on graphical methods, the optimal transmission power allocation ratio of light emitting diode (LED) transmitters and the optimal drone position were obtained, and simulation experiments were designed. The simulation results have verified that the proposed scheme can significantly improve the effective concealment rate of covert users in visible light mobile communication based on non orthogonal multiple access.

Key words: visible light communication, covert communication, nonorthogonal multiple access, unmanned aerial vehicle, power allocation, location optimization

0 引言

随着信息量的爆炸式增长, 人们对于数据传输安全性和隐私保护的关注度日益增加。然而, 目前的无

收稿日期: 2024-01-15。

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(61961007)资助; “认知无线电与信息处理” 省部共建教育部重点实验室主任基金项目(CRKL210107)资助; 桂林电子科技大学研究生创新项目(2023YCX5032)资助。

作者简介: 黄菊(1998—), 女, 广西梧州人, 硕士研究生, 现就读于桂林电子科技大学信息与通信学院电子信息专业, 主要研究方向为可见光通信、隐蔽通信和物理层安全等。曾荣获国家励志奖学金1次, 校级学业一和二等奖学金各1次。

* **通信作者:** 赵响(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为 6G 无线通信、可见光通信、安全通信、通信信号处理。



线通信安全研究主要聚焦于保障通信内容的安全^[1]。在未来的智能商业、医疗及军事等领域中, 仅保护通信内容显然不足以应对所有挑战, 还需加强对通信行为本身的保护。隐蔽通信作为一种近年来备受关注的通信方式, 其核心目标在于防止监视者察觉到任何通信活动的存在, 以确保秘密信息的安全可靠传输^[2]。

可见光通信(VLC)作为未来第六代(6G)系统最具潜力的光无线通信方式之一, 因其独特的物理特性和应用前景而备受关注。特别是在隐蔽通信领域, 基于VLC的技术引起了研究人员的广泛兴趣。例如, 文献[3]探讨了隐蔽VLC中输入信号最优分布及发射机平均光功率的需求, 并指出隐蔽VLC性能可以超越Bash等人提出的平方根法则限制。此外, 文献[4]聚焦于无人机辅助的隐蔽VLC系统, 通过优化无人机悬停高度

黄菊,赵响,赵玉青,等:基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信

以最大化互信息,增强了系统的隐蔽效果。尽管上述研究为隐蔽 VLC 奠定了理论基础,但它们主要针对单用户场景。考虑到实际生活中日益增长的大规模连接需求,多用户通信场景下的隐蔽 VLC 更具现实意义。非正交多址接入(NOMA)作为一种先进的多用户接入技术,不仅能够支持大规模连接,还能显著提升系统的隐蔽吞吐量。然而,由于 VLC 系统与射频(RF)系统之间信道特性和信号特征的差异,直接将 RF 系统中的隐蔽通信策略应用于 VLC 并不适用。而 NOMA 技术通过发送端的叠加编码,允许公共用户和隐蔽用户在同一频谱资源块上进行信息传输。这一特性使得公共用户的通信活动可以掩护隐蔽用户,增加监测者检测隐蔽通信行为的难度。因此,将 NOMA 技术引入隐蔽 VLC 不仅可以促进安全通信技术的发展,还可能带来新的隐蔽通信机制和技术革新。此外,在地面或室内的 VLC 接入点因不可抗力因素遭到损毁时,可以通过部署配备有发光二极管(LED)发射机的移动设备——无人机(UAV)来充当临时基站,从而辅助恢复通信服务。这种 UAV 辅助的移动 VLC 方案特别适用于夜间搜救、紧急通信等场景。根据现有文献[11-14],关于移动 VLC 的研究大多集中在通过优化无人机的位置以实现网络吞吐量最大化、发射功率最小化以及扩大覆盖用户范围等方面。然而,这些研究主要聚焦于单用户场景下的隐蔽通信问题。目前,尚未见到针对多用户场景下 UAV 辅助移动 VLC 隐蔽通信的相关研究。

因此,本文针对 UAV 辅助的移动 VLC 场景,展开基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信性能研究,为光源移动情况下多用户 VLC 系统的隐蔽通信提供理论基础。

1 系统模型

本文建立了一个基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信模型,如图 1 所示。该模型包含 1 个 UAV-LED 发射机 Alice、2 个 NOMA 用户(其中近用户端 Bob 为隐蔽用户,远用户端 Roy 为公共用户)和 1 个设法检测系统中隐蔽通信行为的监测者 Willie。UAV 携带 LED 移动,当悬停在一定高度时公开地传输信息给公共用户 Roy,且在 Willie 监视下与隐蔽用户 Bob 进行秘密信息传输。

假设 Alice 已知用户 Bob 和 Roy 的位置,并且可获得他们的信道状态信息(CSI),而 Willie 处于静默状态并隐藏在暗处,其位置是未知的,Alice 则不能获得

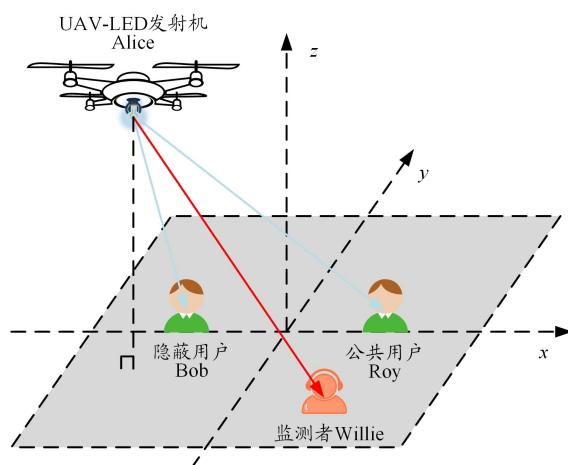


图 1 基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信模型图

关于 Willie 的 CSI。考虑系统处于最坏的情况,即 Willie 可获得关于 Alice 的瞬时 CSI。

1.1 信道模型

由文献[15]可知,假设 LED 的光照模型建立为朗伯辐射模型,Alice 与接收方 k 之间的信道增益 h_k 表示为

$$h_k = \begin{cases} \frac{A_r(m+1)}{2\pi d_k^2} \cos^m \phi_k T_s(\varphi_k) g(\varphi_k) \cos \varphi_k, & 0 \leq \varphi_k \leq \psi_c \\ 0, & \varphi_k > \psi_c \end{cases} \quad (1)$$

其中, $k \in \{B, R, W\}$, B, R, W 分别对应接收方 Bob、Roy、Willie。 A_r 是 k 处光电探测器(PD)的物理面积,朗伯发射阶数 $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$, $\Phi_{1/2}$ 为半功率半角, d_k 是 LED 到 k 之间的欧式距离, ϕ_k 是发射机关于 k 的出射角, φ_k 是垂直于 k 接收器的入射角, $T_s(\varphi_k)$ 为接收端滤波器的增益,光集中器的增益 $g(\varphi_k) = \eta^2 / \sin^2 \psi_c$, η 为折射系数, ψ_c 为接收端的视场(FOV)。在 LED 与 PD 法线方向平行的情况下, ϕ_k 与 φ_k 相等,且有 $\cos \phi_k = \cos \varphi_k = L/d_k$, L 为 Alice 的悬停高度。

为便于分析,本文采用三维笛卡尔坐标系表示各节点的位置,坐标中心建立在 Bob 和 Roy 之间连接线的中点上。Bob 和 Roy 之间的连接线作为 x 轴,中垂线作为 y 轴。Alice 的水平位置 $\mathbf{q}_u = [x_u, y_u]^T$, Bob、Roy 和 Willie 的水平位置分别为 $\mathbf{q}_b = [-a, 0]^T$ 、 $\mathbf{q}_r = [a, 0]^T$ 和 $\mathbf{q}_w = [x_w, y_w]^T$, a 为 Roy 在 x 轴上距原点的距离。

1.2 传输方案

Alice 有 2 种信息可以传输:一种是一直传输的公共信息 s_R , 另一种是偶尔传输的隐蔽信息 s_B 。因此,

Alice 共有 2 种传输情况:

1) 情况 H_0 : Alice 只向 Roy 传输公共信息, 而没有向 Bob 传输隐蔽信息;

2) 情况 H_1 : Alice 使用了叠加编码技术, 将公共信息和隐蔽信息叠加在一起, 传输公共信息向 Roy 的同时传输隐蔽信息给 Bob。因此, Alice 在第 n 个符号周期发送的电信号 $s[n]$ 表示为

$$s[n] = \begin{cases} \sqrt{P_R} s_R[n], & H_0 \\ \sqrt{P_R} s_R[n] + \sqrt{P_B} s_B[n], & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N$, N 表示一个通信块包含的符号总数, Alice 发送给公共用户 Roy 的功率 P_R 和发送给隐蔽用户 Bob 的功率 P_B , 满足 $P_R/P_B = \beta_R/\beta_B$, $\beta_R > \beta_B$, $\beta_R + \beta_B = 1$ 。

电信号 $s[n]$ 经电/光转换后, 成为光信号 $X[n]$, 假设 $X[n]$ 的分布是指数分布^[3]。在 H_0 和 H_1 这 2 种情况下, 光信号 $X[n]$ 通过 VLC 链路到达接收方, 在 PD 中进行光/电转换, 并经过接收机中的隔直电路去除直流偏置后, 接收方 $k(k \in \{B, R, W\})$ 接收到的电信号 $y_k[n]$ 表示为

$$y_k[n] = \begin{cases} \zeta \mu h_k \sqrt{P_R} s_R[n] + z_k[n], & H_0 \\ \zeta \mu h_k (\sqrt{P_R} s_R[n] + \sqrt{P_B} s_B[n]) + z_k[n], & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, ζ 是电/光转换因子, μ 是光/电转换因子, $z_k[n]$ 是信道中的加性高斯白噪声(AWGN), 其均值为 0, 方差为 σ_k^2 。

为保证秘密信息传输的隐蔽性, 本文设计了一种发射功率方案: Alice 和公共用户 Roy 之间的公共传输采用随机发送功率策略, 即发送功率在 $[0, P_R^{\max}]$ 内遵循连续均匀分布, 其概率密度函数 $f_{P_R}(x)$ 为

$$f_{P_R}(x) = \begin{cases} 1/P_R^{\max}, & 0 \leq x \leq P_R^{\max} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_R^{\max}$ 是 Alice 对公共用户 Roy 发送的最大功率。引入发送功率随机性的目的是使 Willie 分辨不出究竟是因为秘密信息传输行为所导致的功率变化, 还是随机功率的传输所导致的功率变化, 从而保证秘密信息的安全传输。

2 Willie 检测性能分析

由文献[3]可知, 在隐蔽 VLC 中, 当输入信号是服

黄菊, 赵响, 赵玉青, 等: 基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信

从指数分布的最佳输入信号时, Willie 接收到信号趋近于高斯分布。因此, 本文假设 Willie 接收信号的分布是高斯分布。在 H_0 情况下, Willie 接收信号的分布表示为 $f(y_W[n] | H_0) \sim N(0, \sigma_{H_0}^2)$, 其均值为 0, 方差为 $\sigma_{H_0}^2 = \zeta^2 \mu^2 h_W^2 P_R + \sigma_W^2$; 在 H_1 情况下, Willie 接收信号的分布表示为 $f(y_W[n] | H_1) \sim N(0, \sigma_{H_1}^2)$, 其均值为 0, 方差 $\sigma_{H_1}^2 = \zeta^2 \mu^2 h_W^2 (P_R + P_B) + \sigma_W^2$ 。

根据费雪-奈曼因子分解定理^[16], Willie 使用功率检测器来进行检测, 判决规则^[17]为

$$P_W = \begin{cases} 1/N \sum_{n=1}^N |y_W[n]|^2 > \lambda, & D_1 \\ 1/N \sum_{n=1}^N |y_W[n]|^2 < \lambda, & D_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_W 表示 Willie 在一个通信块中的平均接收功率, $y_W[n]$ 表示式(3)中 Willie 接收到的电信号, D_1 和 D_0 分别表示 Willie 做出的“Alice 传输了秘密信息”和“Alice 没有传输秘密信息”的判决, λ 是判决门限。当 $N \rightarrow \infty$ 时, 根据强大数定理, 可以进一步得到 P_W 的表达式为

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P_W = \begin{cases} \zeta^2 \mu^2 h_W^2 P_R + \sigma_W^2, & H_0 \\ \zeta^2 \mu^2 h_W^2 (P_R + P_B) + \sigma_W^2, & H_1 \end{cases} \quad (6)$$

本文采用错误检测概率来评估 Willie 检测性能。在 H_0 和 H_1 的先验概率相等情况下^[18], Willie 的错误检测概率可以表示为

$$\xi_W = \begin{cases} 1, & \lambda < \sigma_W^2 \\ 1 - [(\lambda - \sigma_W^2) \beta_B] / P_R^{\max} \zeta^2 \mu^2 h_W^2, & \sigma_W^2 \leq \lambda \leq P_R^{\max} \zeta^2 \mu^2 h_W^2 + \sigma_W^2 \\ [(\lambda - \sigma_W^2) \beta_R] / (P_R^{\max} \zeta^2 \mu^2 h_W^2), & P_R^{\max} \zeta^2 \mu^2 h_W^2 + \sigma_W^2 < \lambda \leq (P_R^{\max} \zeta^2 \mu^2 h_W^2 + \sigma_W^2) / \beta_R + \sigma_W^2 \\ 1, & \lambda > (P_R^{\max} \zeta^2 \mu^2 h_W^2) / \beta_R + \sigma_W^2 \end{cases} \quad (7)$$

在隐蔽通信中, 通常将 $\xi_W^* \geq 1 - \epsilon$ 作为隐蔽约束条件, 其中 ξ_W^* 是 Willie 的最小错误检测概率, ϵ 是决定隐蔽等级的一个任意小的正数。隐蔽约束条件 $\xi_W^* \geq 1 - \epsilon$ 表明 Willie 的最小错误检测概率足够大时, Alice 和 Bob 之间可以实现隐蔽传输。根据式(7)可以分析得

黄菊, 赵响, 赵玉青, 等: 基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信

出: 判决门限 λ 在 $\sigma_W^2 \leq \lambda \leq P_R^{\max} \xi^2 \mu^2 h_W^2 + \sigma_W^2$ 范围内取值时, Willie 的错误检测概率 ξ_W 关于 λ 单调递减; λ 在 $P_R^{\max} \xi^2 \mu^2 h_W^2 + \sigma_W^2 < \lambda \leq (P_R^{\max} \xi^2 \mu^2 h_W^2) / \beta_R + \sigma_W^2$ 范围内取值时, ξ_W 关于 λ 单调递增。因此, 存在一个最优门限值 λ^* 使得 ξ_W 达到最小, 即 $\lambda^* = P_R^{\max} \xi^2 \mu^2 h_W^2 + \sigma_W^2$ 时, Willie 的最小错误检测概率 $\xi_W^* = \beta_R$ 。

3 Alice 与 Bob 和 Roy 之间的传输性能分析

由于在 H_0 情况下不进行隐蔽信息的传输, 因此本文重点分析 H_1 情况下的解码过程, 在这种情况下, 公共信息被传输给 Roy 的同时, 隐蔽信息也传输给 Bob。Bob 采用连续干扰消除(SIC)技术顺序解码 $s_R[n]$ 和 $s_B[n]$, 假设 Bob 解码 $s_R[n]$ 时的信干噪比为 $\gamma_{B \rightarrow R}$ 和解码 $s_B[n]$ 时的信噪比为 γ_B ; 假设 Roy 解码 $s_R[n]$ 时的信干噪比为 γ_R 。

因此, 可以得到 Bob 的传输中断概率 Ξ_B 表达式为

$$\Xi_B = 1 - \Pr(\gamma_{B \rightarrow R} > \alpha_R, \gamma_B > \alpha_B) = \begin{cases} 1, \rho \leq 0 \\ (\alpha_B \sigma_B^2) / (P_R^{\max} \xi^2 \mu^2 h_B^2 \rho), 0 < \rho < \alpha_B / (\alpha_R + \alpha_B) \\ (\alpha_B \sigma_B^2) / [P_R^{\max} \xi^2 \mu^2 h_B^2 (1 - \alpha_R \rho)], \alpha_B / (\alpha_R + \alpha_B) \leq \rho < 1/\alpha_R \\ 1, \rho \geq 1/\alpha_R \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\Pr$ 为信干噪比及信噪比在不同情况下的概率, α_B 表示 Bob 在解码 $s_R[n]$ 时设定的目标信噪比值 ($\alpha_B = 2^{R_B^{\text{th}}} - 1$), R_B^{th} 是 Bob 处设定的目标通信速率值, α_R 是 Roy 在解码 $s_R[n]$ 时设定的目标信干噪比值 ($\alpha_R = 2^{R_R^{\text{th}}} - 1$), R_R^{th} 是 Roy 处设定的目标通信速率值。 ρ 是 Alice 的发送功率分配比, 其值为 $\rho = \beta_B / \beta_R$, 由于 $\beta_R > \beta_B$, 则 $\rho \in [0, 1)$ 。

Roy 的传输中断概率 Ξ_R 的表达式为

$$\Xi_R = \Pr(\gamma_R < \alpha_R) = \begin{cases} (\alpha_R \sigma_R^2) / [P_R^{\max} \xi^2 \mu^2 h_R^2 (1 - \alpha_R \rho)], 0 \leq \rho < 1/\alpha_R \\ 1, \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

4 优化问题形成

本文采用有效隐蔽速率作为系统的隐蔽性能指

标, 在隐蔽性约束条件、可靠性约束条件以及 UAV 可飞行区域约束条件的基础上, 通过联合优化 Alice 的水平位置 q_0 和 Alice 发送功率分配比 ρ 以最大化 Bob 的有效隐蔽速率 R_c , 该优化问题具体表示为

$$\max_{\rho, q_0} R_c = R_B^{\text{th}} (1 - \Xi_B) \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } C_1: \xi_W^* \geq 1 - \epsilon \quad (10b)$$

$$C_2: \Xi_R \leq \Xi_{\text{th}} \quad (10c)$$

$$C_3: h_B > h_R \quad (10d)$$

$$C_4: -l_x \leq x_u \leq l_x, -l_y \leq y_u \leq l_y \quad (10e)$$

其中, 约束 C_1 为隐蔽性约束, 以保证 Alice 和 Bob 之间的信息的隐蔽传输; 约束 C_2 为可靠性约束, Ξ_{th} 是 Roy 所允许的最大传输中断概率值, 以确保 Roy 的信息传输能正常进行; 约束 C_3 是为了在 Alice 移动的情况下始终保证 Bob 较于 Roy 而言是强用户; 约束 C_4 是设定的一个 UAV 飞行水平位置区域, 在这个区域内 Alice 可以与地面用户进行有效通信, 其中 l_x 和 l_y 分别是 x 轴正半轴和 y 轴正半轴方向上所设定的 UAV 飞行水平位置区域范围的大小。

本文通过对优化问题内部隐藏的优化变量之间的特征关系进行分析与转换, 整理出这些关系, 并应用图解法来推导各个优化变量的最优解析表达式。通过这种方式, 不仅能够直观地理解各变量之间的相互作用, 还能够精确地确定每个变量在最优解下的具体形式。

4.1 发射功率分配比设计

给定 Alice 的可飞行水平区域, 即给定 q_0 情况下, 式(10)退化为最优 Alice 发射功率分配问题, 表达式如下:

$$\max_{\rho} R_c = R_B^{\text{th}} (1 - \Xi_B) \quad (11a)$$

$$\text{s.t. } C_1, C_2 \quad (11b)$$

式(11)的求解过程如下:

对于隐蔽性约束 C_1 , 根据第 2 节中 Willie 检测性能的分析, 可以得知 Willie 的最小错误检测概率为 $\xi_W^* = \beta_R$, 约束 C_1 为 $\beta_R \geq 1 - \epsilon$ 。根据 1.2 节中的设定, 有 $\beta_R = 1 - \beta_B$, 约束 C_1 则可以转换成 $\beta_B \leq \epsilon$ 的形式。由于 $\beta_B + \beta_R = 1$, 因此可以得到 $\rho = \beta_B / (1 - \beta_B)$; 最终约束 C_1 转换为 $\rho \leq \epsilon / (1 - \epsilon)$ 。

对于可靠性约束 C_2 , 由式(9)可知, 当 $\rho = 0$ 时 Ξ_R 取最小值, 然而 $\rho = 0$ 表示发射端 Alice 分配给隐蔽用户 Bob 的功率为零, 在这种情况下若想在发射端 Alice 和隐蔽用户 Bob 之间进行隐蔽通信显然是不可能的,

则 $\rho=0$ 不成立。因此,将式(9)代入约束 C_2 ,经过整理,最终约束 C_2 转换为 $\rho \leq 1/\alpha_R - [\sigma_R^2 / (P_R^{\max} \Xi_{th} \zeta^2 \mu^2 h_R^2)]$ 。

综合以上可得

$$\rho \leq \min \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon}, \frac{1}{\alpha_R} - \frac{\sigma_R^2}{P_R^{\max} \Xi_{th} \zeta^2 \mu^2 h_R^2} \right) \quad (12)$$

再对式(11)进行进一步的分析,可得 Alice 最优功率分配比 ρ^* 的表达式为

$$\rho^* = \min \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon}, \frac{1}{\alpha_R} - \frac{\sigma_R^2}{P_R^{\max} \Xi_{th} \zeta^2 \mu^2 h_R^2}, \frac{\alpha_B}{\alpha_R + \alpha_B} \right) \quad (13)$$

4.2 Alice 水平位置设计

在给定 Alice 的发射功率分配比值,并且当 L 为固定值时,式(10)退化为一个仅与 Alice 水平位置相关的优化问题,具体如下:

$$\min_{\mathbf{q}_u} \|\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_b\|^2 \quad (14a)$$

$$\text{s.t. } C_2 \quad (14b)$$

$$C_5: -l_x \leq x_u \leq 0, -l_y \leq y_u \leq l_y \quad (14c)$$

由于 Alice 的最优功率分配比与 Alice 的水平位置相互耦合,无法直接对 Alice 的最优水平位置进行求解。因此,本文在不同 ρ^* 的分类情况下,使用图解法对 Alice 的最优水平位置 $\mathbf{q}_u^*$ 进行分析^[19]。

考虑到 ρ^* 的取值与 3 个不同公式有关,本文的求解过程分为以下几个步骤:首先,对比那 2 个与优化变量无关的公式,根据它们之间的关系将问题分为 2 种情况。接着,在每种情况下,分别处理第三个与优化变量相关的公式,对其进行重新分类。通过上述步骤,可以确定 ρ^* 和新的约束条件。最后,在这些新约束条件下,对原始的优化问题进行求解,最终得到优化变量 $\mathbf{q}_u^*$ 的最优解。求解过程情况具体如下:

情况 1 $\epsilon/(1-\epsilon) \leq \alpha_B/(\alpha_R + \alpha_B)$

情况 1-1: 若 $\epsilon/(1-\epsilon) \leq 1/\alpha_R - (\sigma_R^2 / (P_R^{\max} \Xi_{th} \zeta^2 \mu^2 h_R^2))$ 作为约束条件,这时 $\rho^* = \epsilon/(1-\epsilon)$ 。注意到此约束条件与约束 C_2 是一致的,经过整理,约束 C_2 转换为 $\|\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_f\| \leq r_0$,其中,

$$r_0 = \sqrt{\frac{\Xi_{th} P_R^{\max} \zeta^2 \mu^2 \Gamma^2 \{1 - \alpha_R [\epsilon/(1-\epsilon)]\}}{\alpha_R \sigma_R^2}} - L^2$$

将 $\|\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_f\| \leq r_0$ 结合约束 C_5 分析考虑,根据 Alice 的可飞行区域可知 r_0 需满足条件 $r_0 > a_0$ 。因此,式(14)可以重写为

$$\min_{\mathbf{q}_u} \|\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_b\|^2 \quad (15a)$$

$$\text{s.t. } C_5 \quad (15b)$$

$$C_6: a < \|\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_f\| \leq r_0 \quad (15c)$$

在确定 ρ^* 和新的约束条件之后,接下来再分类讨论 r_0 的取值,并采用图解法来辅助确定优化变量 $\mathbf{q}_u^*$ 的最优解。

情况 1-1-1: 当 $a < r_0 < 2a$ 时,二维模型图如图 2(a) 所示。图中阴影区域是 Alice 移动区域范围,要使 Alice 和 Bob 之间的距离最短,则 Alice 的最优水平位置 $\mathbf{q}_u^*$ 应取 x 轴与以半径为 r_0 的圆的交点 F_{a1} ,即 $\mathbf{q}_u^* = [-(r_0 - a), 0]^T$ 。

情况 1-1-2: 当 $r_0 \geq 2a$ 时,二维模型图如图 2(b) 所示。Alice 的最优水平位置 $\mathbf{q}_u^*$ 应取 F_{a2} 点,即 Bob 点的水平位置,因此 $\mathbf{q}_u^* = [-a, 0]^T$ 。

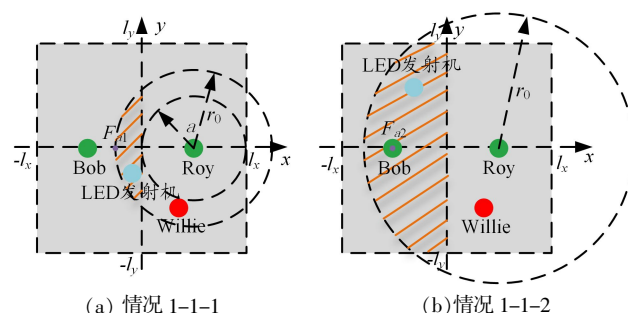


图 2 情况 1-1 的二维模型图

情况 1-2: 若 $\epsilon/(1-\epsilon) \geq 1/\alpha_R - (\sigma_R^2 / (P_R^{\max} \Xi_{th} \zeta^2 \mu^2 h_R^2))$ 作为约束条件,这时 $\rho^* = 1/\alpha_R - \sigma_R^2 / (P_R^{\max} \Xi_{th} \zeta^2 \mu^2 h_R^2)$ 。将 ρ^* 代入式(14)的约束 C_2 中,可以发现 $\|\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_f\| \leq r_0$ 总是成立的,因此约束 C_2 可以去除。考虑到上述新的约束条件并结合所设定的 Alice 可飞行水平区域,式(14)可重写为

$$\min_{\mathbf{q}_u} \|\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_b\|^2 \quad (16a)$$

$$\text{s.t. } C_5 \quad (16b)$$

$$C_7: r_0 \leq \|\mathbf{q}_u - \mathbf{q}_f\| \leq r_1 \quad (16c)$$

其中, $r_1 = \sqrt{l_y^2 + (l_x + a)^2}$, 表示 Roy 节点到 M 点或者 N 点(Alice 可飞行区域的边角点)的距离。

情况 1-2-1: 当 $r_0 \leq 2a$ 时,二维模型图如图 3(a) 所示。图中, Alice 的最优水平位置 $\mathbf{q}_u^*$ 应取 F_{b1} 点,即

黄菊,赵响,赵玉青,等:基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信

Bob 点的水平位置,因此 $\mathbf{q}_u^* = [-a, 0]^T$ 。

情况 1-2-2: 当 $2a < r_0 < l_x + a$ 时, 二维模型图如图 3(b) 所示。图中 Alice 的最优水平位置 $\mathbf{q}_u^*$ 应取 x 轴与以半径为 r_0 的圆的交点 F_{b2} 点, 即 $\mathbf{q}_u^* = [-(r_0 - a), 0]^T$ 。

情况 1-2-3: 当 $l_x + a \leq r_0 \leq r_1$ 时, 二维模型图如图 3(c) 所示。图中 Alice 的最优水平位置 $\mathbf{q}_u^*$ 应取 $x = -l_x$ 线段与以 r_0 为半径的圆相交的 F_{b3} 或者 F_{b2} 点, 即 $\mathbf{q}_u^* = [-l_x, \pm \sqrt{r_0^2 - (l_x + a)^2}]^T$ 。

情况 2 $\alpha_B / (\alpha_R + \alpha_R \alpha_B) < \epsilon / (1 - \epsilon)$

情况 2-1: 若 $\alpha_B / (\alpha_R + \alpha_R \alpha_B) \leq 1 / \alpha_R - (\sigma_R^2) / (P_R^{\max} \times \Xi_{th} \zeta^2 \mu^2 h_R^2)$ 作为约束条件, 这时 $\rho^* = \alpha_B / (\alpha_R + \alpha_R \alpha_B)$ 。求解过程与情况 1 中的情况 1-1 的求解过程相似。

情况 2-2: 若 $\alpha_B / (\alpha_R + \alpha_R \alpha_B) \geq 1 / \alpha_R - \sigma_R^2 / (P_R^{\max} \times \Xi_{th} \zeta^2 \mu^2 h_R^2)$ 作为约束条件, 这时 $\rho^* = 1 / \alpha_R - (\sigma_R^2) / (P_R^{\max} \times \Xi_{th} \zeta^2 \mu^2 h_R^2)$ 。求解过程与情况 1 中的情况 1-2 的求解过程相似。

总的优化过程实现思路为: 首先, 对式 (13) 中不含优化变量的 2 个关系式进行比较。通过比较这 2 个表达式的大小, 将问题分为 2 种主要情况 (标记为情况 1 和情况 2)。接着, 在每种情况下, 根据不同的约束条件, 计算 Bob 的最大有效隐蔽速率 $R_c^{\max}$, 并找出使目标函数达到最大值时对应的 $\mathbf{q}_u^*$ 和 ρ^* 。

5 仿真结果与分析

本文通过数值仿真来验证所提系统隐蔽性能。假

定 PD 物理面积 $A_r = 1 \text{ cm}^2$, 滤波器增益 $T_s = 1$, PD 折射系数 $\eta = 1.5$, 电/光转换因子 $\zeta = 1$, 光/电转换因子 $\mu = 1$, AWGN 功率 $\sigma_k^2 = -96 \text{ dBm}$, Roy、Bob 处设定的目标通信速率值 $R_R^{\text{th}} = 1 \text{ b/s}$, $R_B^{\text{th}} = 1.5 \text{ b/s}$, Bob、Roy 的水平位置分别为 $[-2, 0]^T$ 和 $[2, 0]^T$, Alice 悬停高度 L 为 9 m, 设定 Alice 飞行水平位置区域的 l_x 和 l_y 都为 7 m, Alice 对 Roy 发送的最大功率 $P_R^{\max}$ 为 7 W。

LED 半功率半角和隐蔽等级 ϵ 的变化对 Bob 的最大有效隐蔽速率的影响如图 4 所示。可以看出, Bob 的最大有效隐蔽速率随着 LED 半功率半角的增大而减小, 同时随着隐蔽等级 ϵ 的增大而增大。这是因为 LED 半功率半角的增大意味着 LED 发射光束变宽, 覆盖范围扩大, 这增加了隐蔽信息被第三方 (例如 Willie) 检测到的可能性。因此, 隐蔽通信的约束条件变得更加严格, 能够安全传输的隐蔽信息量减少, 导致 Bob 的最大有效隐蔽速率降低。另一方面, 当隐蔽等级提高时, 它实际上放松了对隐蔽性的要求, 使得隐蔽约束更

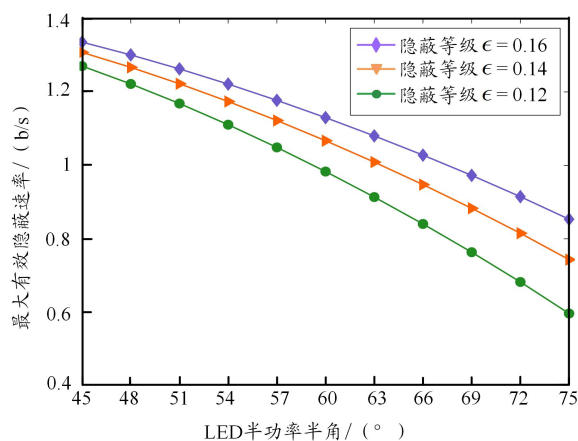


图 4 LED 半功率半角和隐蔽等级对系统隐蔽性能的影响

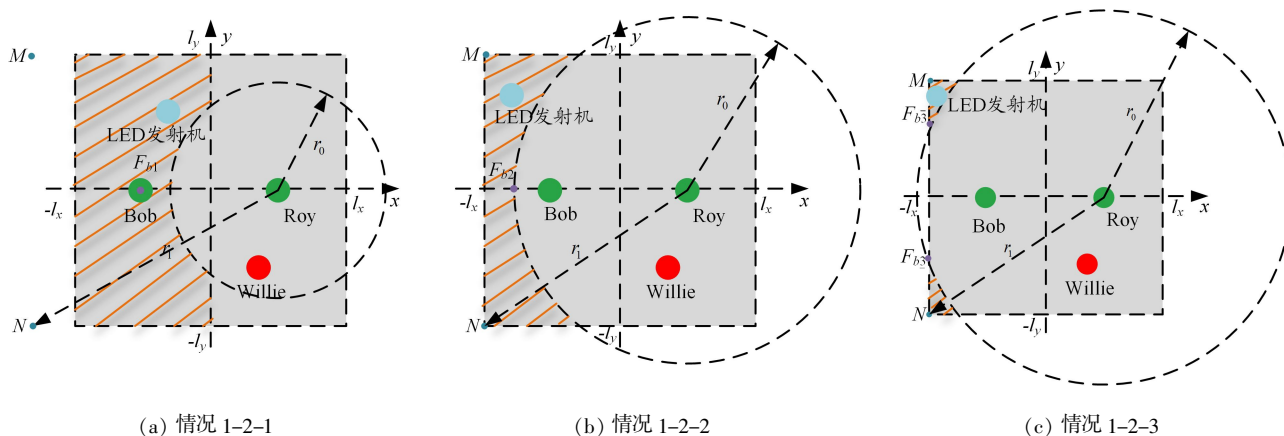


图 3 情况 1-2 的二维模型图

容易满足。这意味着,在更高的隐蔽等级下,可以在不影响隐蔽性的前提下传输更多的信息。因此,Bob 的最大有效隐蔽速率会随着隐蔽等级 ϵ 的增加而增加。

假设残余干扰系数 $\delta=0.04$,Bob 的 FOV ψ_c 在理想 SIC 和非理想 SIC 情况下对系统的隐蔽性影响情况,如图 5 所示。可以看出,Bob 的最大有效隐蔽速率随着视场的增大而减小。这是因为视场的增大让 Bob 接收到更多的噪声,使得干扰变得严重,因此最大有效隐蔽速率会减小;在 Bob 视场相同的情况下,理想 SIC($\delta=0$) 情况下的 Bob 最大有效隐蔽速率始终大于非理想 SIC 情况下的 Bob 最大有效隐蔽速率,这是因为当 Bob 处于非理想 SIC 状态时,残余干扰导致 Bob 的接收信噪比变小,因此 Bob 最大有效隐蔽速率也会减小。

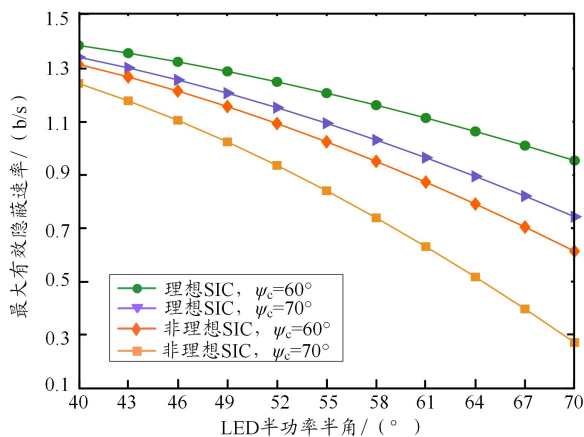


图 5 隐蔽用户 Bob 的 FOV 以及理想 SIC 与非理想 SIC 方案对系统隐蔽性能的影响

假设传统正交多址接入(OMA)方案中带宽分配系数 $\nu=0.5$,Alice 悬停高度 L 以及 NOMA 方案与传统 OMA 方案对系统隐蔽性能的影响情况,如图 6 所示。可以看出,在同一传输方案中,随着 Alice 悬停高度 L 的增大,Bob 的最大有效隐蔽速率会减小。当 Alice 的悬停高度相同时,采用传统 OMA 方案时,Bob 的最大有效隐蔽速率总是低于使用 NOMA 方案的情况。这表明,在本文提出的方案中引入 NOMA 技术能够有效地提升系统的隐蔽性能。

本文所提优化方案与基准方案对 Bob 的有效隐蔽速率的影响如图 7 所示。基准方案包含 2 种:

- 1)基准方案 1:随机取 Alice 位置,只优化 Alice 发送功率分配比;
- 2)基准方案 2:随机取 Alice 发送功率分配比,只优化 Alice 位置。

从图 7 可以看出,本文所提优化方案中 Bob 的有效隐蔽速率显著高于基准方案 1 和基准方案 2 中的对

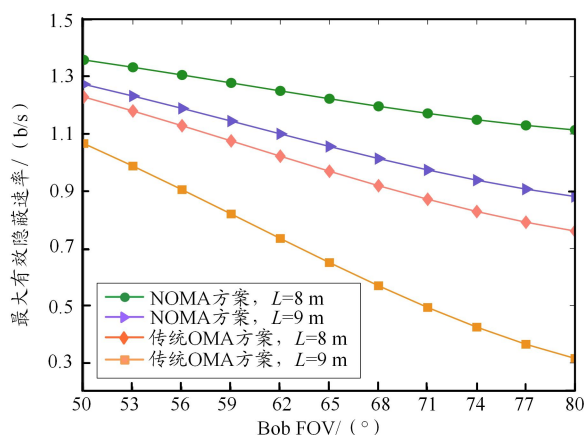


图 6 Alice 悬停高度以及 NOMA 方案与传统 OMA 方案对系统隐蔽性能的影响

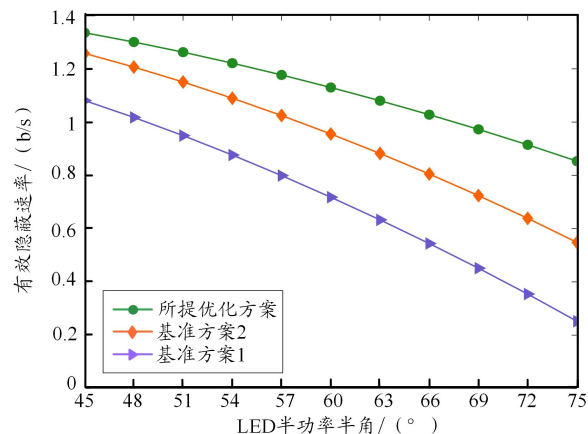


图 7 所提优化方案与基准方案的对比

应速率。这表明,对 Alice 的位置及发送功率分配比进行联合优化后,系统的隐蔽性能得到了明显提升。

6 结束语

本文研究了基于 NOMA 的可见光无线移动 VLC 的隐蔽通信,构建了隐蔽性、可靠性以及移动性联合约束条件下的隐蔽用户的有效隐蔽速率最大化问题,基于图解法获得了使隐蔽用户的有效隐蔽速率达到最大的最优 LED 发射机发送功率分配比和最优 UAV 位置。与传统 OMA 方案和基准方案相比,所提出的基于 NOMA 的移动 VLC 的隐蔽通信方案能够显著提升隐蔽用户的有效隐蔽速率。仿真结果表明:VLC 参数(如 LED 的半功率角、PD 的视场角以及 LED 与 PD 之间的垂直距离)在一定程度上影响系统的隐蔽性能。为了确保有效的隐蔽通信,这些参数的设计不宜过大。

在未来的工作中,我们将继续研究 NOMA 系统中多个隐蔽用户的 VLC 与激光通信,并通过实地验证进一步证明系统的实用价值。

黄菊, 赵响, 赵玉青, 等: 基于 NOMA 的可见光无线移动系统的隐蔽通信

参考文献:

- [1] LU X, XIAO L, LI P, et al. Reinforcement learning-based physical cross-layer security and privacy in 6G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(1): 425–466.
- [2] HIEU N Q, HOANG D T, NIYATO D, et al. Joint power allocation and rate control for rate splitting multiple access networks with covert communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(4): 2274–2287.
- [3] 王金元, 余鹏飞, 石佳炜, 等. 隐蔽可见光通信的基本性能限研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(8): 2619–2628.
- [4] WANG J, SU D, FENG P, et al. Optimal height of UAV in covert visible light communications[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(10): 2682–2682.
- [5] TAO L, YANG W, LU X, et al. Achieving covert communication in uplink NOMA systems via energy harvesting jammer[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(12): 3785–3789.
- [6] WANG M, YANG W, LU X, et al. Channel inversion power control aided covert communications in uplink NOMA systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(4): 871–875.
- [7] TAO L, YANG W, YAN S, et al. Covert communication in downlink NOMA systems with random transmit power[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 2000–2004.
- [8] ZHANG Y, HE W, LI X, et al. Covert communication in downlink NOMA systems with channel uncertainty[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(19): 19101–19112.
- [9] SU Y, FU S, SI J, et al. Optimal hovering height and power allocation for UAV-aided NOMA covert communication system [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(6): 937–941.
- [10] LV L, WU Q, LI Z, et al. Covert communication in intelligent reflecting surface-assisted NOMA systems: design, analysis, and optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(3): 1735–1750.
- [11] ANWAR D N, PEER M, SRIVASTAVA A, et al. 3-D deployment of VLC enabled UAV networks with energy and user mobility awareness[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6(4): 1972–1989.
- [12] ELTOKHEY M W, KHALIGHI M-A, GHASSEMLOOY Z. UAV location optimization in MISO ZF pre-coded VLC networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(1): 28–32.
- [13] WANG Y, CHEN M, YANG Z, et al. Deep learning for optimal deployment of UAVs with visible light communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7049–7063.
- [14] PHAM Q-V, HUYNH-THE T, ALAZAB M, et al. Sum-rate maximization for UAV-assisted visible light communications using NOMA: swarm intelligence meets machine learning[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 10375–10387.
- [15] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100–107.
- [16] DEGROOT M H, SCHERVISH M J. Probability and statistics [M]. London: Pearson, 2011.
- [17] HU J, YAN S, ZHOU X, et al. Covert communication achieved by a greedy relay in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(7): 4766–4779.
- [18] YAN S, HANLY S V, COLLINGS I B. Optimal transmit power and flying location for UAV covert wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(11): 3321–3333.
- [19] 周小波, 彭旭, 于辉, 等. 无人机网络中人工噪声增强的短包隐蔽通信[J]. 信号处理, 2022, 38(8): 1601–1609.